

纪念周培源湍流理论创建八十周年

颜大椿¹⁾

(北京大学力学系, 北京 100871)

周培源先生是中国湍流理论研究的创始人和力学学科的缔造者, 是理论物理在相对论领域享誉海内外的科学巨匠, 是北大百余年来历任校长中堪称与蔡元培先生齐名并在欧美学界享有盛誉的大教育家, 也是我国力学界唯一的一位与冯·卡门齐名并联手创建国际理论和应用力学联合会 (IUTAM) 的大力学家。

周培源湍流学说创始于 1940 年的抗战艰难时期, 先生时任清华大学教授, 辗转在西南联大任教。鉴于我国航空事业十分落后, 开始他从理论物理的高度研究湍流。周培源湍流学说首先指出湍流研究的关键并不是单纯研究 NS 方程的求解, 而是从宏观理论和微观理论的方法探索湍流的本质, 证明湍流具有调和特性和脉动压力与脉动速度之间的相关性, 在二十世纪中关于湍流的波涡之争、湍流声产生机制之争以及湍流与混沌之争的三次世纪性大辩论中, 形成与西方各家学派不同的独特的中国湍流学派。周培源湍流理论的重要贡献主要有以下几个方面。

第一, 关于湍流的本质。周培源学说认为, 湍流是一种综合性物理现象, 并于 1940 年发表的《论求解湍流应力的推广雷诺方法兼论湍流的本质》一文中指出, “欧拉方程和 NS 方程只解释湍流的宏观现象, 要解释更深层次所蕴藏的基本物理过程必须用更加丰富的微观理论。前者用压力、密度和温度的热力学定律, 后者则用气体分子运动论和主导气体分子运动的统计力学定律。”换言之, 湍流宏观理论适用 NS 方程, 而微观理论则不适用 NS 方程。例如, 湍流的声产生规律、等离子体湍流、量子湍流、两相流中的离散相湍流等。

最典型的例子是关于湍流声产生机制之争。周

培源在讲授湍流课时指出, 声是湍流的基本特性, 湍流有声产生机制, 而层流没有声产生机制。但是, Lighthill(1952) 的空气动力声产生理论认为声产生和传播过程适用等熵条件下的 NS 方程和连续性方程, 由此证明湍流流动中的脉动雷诺应力是声学波动方程中的声源项。此项成果受到学界广泛引用, 并列入剑桥大学出版的 *A Voyage through Turbulence* 一书中湍流研究百年大事记, 成为关于湍流声产生的世纪之争的焦点。Laufer 和我在实验中证明, 脉动雷诺应力不产生声辐射, 而波动方程中真正的声源项是按周培源理论得到的脉动压力场; 声产生机制与热力学中的等熵条件无关, 而适用分子运动的统计力学得到流体的体积弹性规律。

第二, 湍流具有调和特性。将 NS 方程分解为平均运动方程和湍流脉动方程, 对后者各项求散度后可得由脉动雷诺应力驱动下的脉动压力的泊松方程, 证明湍流中的脉动压力是调和函数。脉动速度的高度随机性影响着脉动压力的相位随机性, 也不改变脉动压力的调和特性, 主要由脉动压力的相干尺度表征。湍流的调和特性与各种以涡为基元的湍流理论不同, 表明湍流的波动特性, 是关于湍流本质的波涡之争中的重要证据。Laufer 和我在射流实验中证明: 泊松方程和 NS 方程有不同的定义域, 所以在射流流场外围存在脉动压力为主导的湍流区域; 射流剪切层中脉动雷诺应力与剪切层外围的脉动压力呈线性关系, 表明两者之间有高度的相关性, 也是湍流由生成初期的高相关到衰减晚期的低相关的主要标志。研究脉动压力和脉动速度的相关性是周培源湍流理论和西方湍流各大学派的均匀各向同性和局部各向同性理论的最大区别, 普遍适用于各种条件的湍流流动。

本文于 2019-12-13 收到。

1) E-mail: yandachun@mech.pku.edu.cn

引用格式: 颜大椿. 纪念周培源湍流理论创建八十周年. 力学与实践, 2020, 42(2): 255-257

Yan Dachun. In memory of 80th anniversary of the establishment of Chou Peiyuan's turbulence theory. *Mechanics in Engineering*, 2020, 42(2): 255-257

第三, 湍流模式理论。周培源(1940和1945)指出, 湍流宏观理论应从求解NS方程入手, 此前虽有Prandtl和Taylor等分别引进动量或涡量传输概念, 得到“混合长”与分子运动论中的平均自由程作类比; “但是, 我们必须放弃这种对湍流的初等物理过程的研究, 而采用另一种完全不同的观点, 将我们的理论建立在湍流脉动方程的基础上。虽然同样采用由欧拉或NS方程得到平均运动方程的雷诺方法, 但不采用雷诺的时间平均。”然后, 用坐标交换方法由湍流脉动方程建立雷诺应力方程组, 通过高阶矩的递推公式以及脉动压力与脉动速度间相关量的半经验公式求解雷诺应力, 在国际上被誉为湍流模式理论的奠基人。

第四, 湍流和混沌。这是二十世纪中下叶关于湍流本质的又一场世纪之争。在1962年Lorenz提出热对流方程的混沌现象后, 非线性动力学研究快速发展。但是, 周培源先生明确指出混沌不是湍流, 是低维随机现象。这一结论在我们对自然对流边界层和逆转捩的实验中得到证明。

湍流的大量研究主要是在实验领域。钱学森先生在回顾湍流研究的发展史时说, 在湍流研究中实验工作有了突破, 理论工作就跟着上了一层楼, 理论工作做着不行了, 一等就是若干年, 又要等待实验工作有所突破。

我国早期的湍流研究限于实验条件, 主要在均匀各向同性湍流的理论范畴, 主要成果有周培源和蔡树棠于1957年关于均匀各向同性湍流后期衰变和用Hill涡模型先求解后统计平均的研究; 周培源和黄永念于1965年关于轴对称涡三阶相关的计算, 1975年得到早期和晚期衰变的统一的准相似规律并向剪切湍流推广。

为了改变湍流实验研究长期落后和空白的情况, 周培源先生于1952年的院系调整中在北大数学系创建我国第一个力学专业, 成为我国高校理工科力学的领头羊; 亲自开设湍流课, 招收研究生和本科生开展湍流理论和实验研究; 按国家十二年科学研究规划于1958年建成我国第一座低湍流度大型低速风洞, 作为北大湍流研究的主要设备。在通过经典的圆球阻力危机实验并完成我国首批自行设计的歼教六和强五战机的动静态空气动力风洞模型实验后, 因国防建设需要由部队管理; 建造我国第一台大型高超音速激波风洞, 并在汉中分校建成研究

型高速和低速风洞实验室, 同时为发展湍流测量技术的需要两度和电子仪器厂及电子学专业联合研究湍流仪。

“文革”期间, 周培源先生坚决抵制对相对论的批判, 在十分困难条件下亲自坚持湍流研究计算; 1973年为落实周恩来总理把北大基础理论研究搞好, 有障碍要扫除, 有钉子要拔掉的重要指示, 领导组织孙天凤、我和符致福对航空、水利、电力、石油、大气、环境、建筑等十余部门中湍流在国计民生重大课题的应用为题作广泛学科调查; 按照大气、环境和电力部门的建议在大风洞开展地表加热冷却下的大气湍流扩散和高层建筑风载荷的系列湍流实验研究。1973年我们在北大大型低速风洞中完成大气边界层湍流结构的风洞模拟实验, 打破我国湍流研究长期以来不具备实验条件的长期空白, 第一次在国内开展大型湍流实验研究。1976年开展对剪切湍流大尺度结构的研究, 并参照Klebanoff和van Atta对数字化湍流测量技术研究举办快速傅里叶变换和湍流数字化测量讲座, 研制模数转换器并用北大计算机ALGOL 60编程。为突破湍流研究长期封闭的局面开展国际合作, 邀请约翰-霍普金斯大学Kovaszny教授来北大讲学, 介绍湍流实验研究的进展, 并联系该校Corrson教授安排博士生Bennett对黄永念的湍流衰变研究作实验校核。用Kovaszny的条件采样技术研究湍流慢变运动中的大尺度结构, 是研究周培源湍流理论的一种有效的方法。改革开放后, 湍流研究引起国内高校、研究所相关工业生产部门的高度关注, 在国内开始形成湍流研究的高潮。

1978年, 周培源先生推荐我为首批赴美访问学者去约翰-霍普金斯大学, 与Kovaszny和Corrson开展关于大尺度剪切湍流的合作实验研究; 推荐黄永念去麻省理工学院和林家翘合作开展各向同性湍流理论的合作研究。在1980年我因Kovaszny的意外去世, 转与南加州大学Laufer教授合作, 对Lighthill湍流声产生理论开展系统的实验研究。实验证明, Lighthill理论得到的声源项是脉动雷诺应力, 实际上并无声辐射, 真正的声源项是在脉动雷诺应力驱动下得到的具有调和特性的脉动压力场, 进一步研究证明与周培源理论完全相符。

我在回国后为博士生首次开设剪切湍流课(turbulent shear flow)介绍国外湍流研究进展, 在

湍流声辐射机制、湍流转捩中的混沌动力学现象, 湍流的逆转捩控制, 离散相湍流以及湍流条件下绕流体空气动力特性等方向对周培源湍流理论作进一步研究。

周培源先生九十高龄时仍坚持为力学界在第三届全国湍流与流动稳定性学术会议上作最后一次题为《非压缩性流体的湍流理论》的一个多小时的长篇报告, 并为会议留下题词“积极开展湍流运动的实验、理论与应用的研究, 为祖国社会主义建设服务”, 再次强调湍流实验的重要性, 坚持湍流研究要着眼于国计民生中重大问题的应用, 充分表现出先生在战乱和复杂环境中矢志不渝追求真理、坚持科学的精神。纵观周培源湍流学说创立以来的八十年历史, 经历三十余年时间完成实验条件的准备, 又经过四十年的实验和理论分析, 当年提出的湍流宏观和微观理论, 湍流波动学说和对雷诺方法加以推广的统计平均方法, 脉动压力的调和特性, 脉动速度和脉动压力场的相干性以及湍流声产生机制等, 至今一一得到实验证明和分析解释, 在工程应用方面也相继取得经济价值很高的突出成果; 形成理论体系完整严谨的湍流学派; 湍流研究也是我国在理科各领域的研究中为数不多的足以令中国人民引以为傲的学术研究方向。

至今, 湍流作为经典物理的世纪难题和二十一世纪数学的七大世纪难题的求解 NS 方程的主要课题, 周培源湍流理论仍然是我们宝贵的财富, 需要我们去传承, 需要我们继续高举这面具有八十年历史并凝聚着几代人心血的大旗, 在理论和实验中不断取得创新和突破。

参 考 文 献

- 1 Chou PY. On an extension of Reynolds' method of finding apparent stresses and the nature of turbulence. *Chinese Journal of Physics*, 1940, 4(1): 1-33
- 2 Chou PY. On velocity correlations and solutions of the equations of turbulent fluctuation. *Quarterly of Applied Mechanics*, 1945, 3(1): 38-54
- 3 周培源. 非压缩性流体的湍流理论, *力学与实践*, 2002, 24(4): 1-9
- 4 颜大椿. 周培源湍流理论及其重大应用. *中国科学: 物理学·力学·天文学*, 2015, 43(9): 1011-1014
- 5 欣兹 JO. 湍流 (上). 黄永念, 颜大椿译. 北京: 科学出版社, 1987
- 6 颜大椿. 实验流体力学. 北京: 北京大学出版社, 2019
- 7 Davidson PA, et al. *A Voyage through Turbulence*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011
- 8 Corrsion S, Kistler AL. The free-stream boundaries of turbulent flows. *NASA Tech Rep 1244*, Washington, 1955
- 9 Kovaszny LSG, Kibens V, Blackwelder RF. Large scale motion in the intermittent region of a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 1970, 41: 283-325
- 10 Lighthill MJ. On sound generated aerodynamically. *Proceedings of the Royal Society*, 1952, A211: 14-37
- 11 Ffowcs Williams JE, Kempton AJ. The noise from the largescale structure of a jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, 84: 673-694
- 12 Laufer J, Yen TC, Yan DC. Noise generated by a low Mach-number jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, 134: 1-31
- 13 Crighton DG, Huerre P. Shear layer pressure fluctuation and superdirective acoustic source. *Journal of Fluid Mechanics*, 1990, 220: 355-368
- 14 Colonius T, Lele SK, Moin P. Sound generation in a mixing layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 1997, 330: 375-409
- 15 Batchelor GK. *An Introduction to Fluid Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1967
- 16 颜大椿. 射流周围的声场和声反馈机制. *力学学报*, 1986, 18(6): 502-508
- 17 颜大椿, 聂进, 孙智利. 低马赫数射流混合层中的相干声源. *声学学报*, 1999, 24(5): 498-504
- 18 孙智利. 湍流的声学行为. [博士论文]. 北京: 北京大学, 2002
- 19 颜大椿. 大气边界层模拟的湍流相似. *力学进展*, 1986, 16(4): 473-486
- 20 颜大椿, 李晨兴, 陈凌等. 超临界状态下串列双圆柱绕流. *力学学报*, 1989, 21(4): 385-390
- 21 颜大椿, 干辉, 罗焯韬等. 虎门悬索桥址的台风谱测量. *工程力学*, 1999, 2(a2): 61-67
- 22 陶建军. 竖直加热平板自然对流边界层内层的稳定性. [博士论文]. 北京: 北京大学, 1998
- 23 颜大椿, 张汉勋. 自然对流边界层中湍流的起源. *力学学报*, 2003, 35(6): 641-649
- 24 孙宝江. 垂直圆管中气液两相湍流的流型转换. [博士论文]. 北京: 北京大学, 1999
- 25 李逸明. 加热平板下湍流边界层的逆转捩. [博士论文]. 北京: 北京大学, 2004
- 26 Yan DC, Zhang Z, Shi HM, et al. Reverse transition of a turbulent boundary layer. *Modern Physics Letters*, 2005, 19: 1603-1606

(责任编辑: 胡漫)